

Modellgestützte Regelung, ein Beitrag zur Autonomie von Prozessen und Systemen

Gilles, Ernst-Dieter

Veröffentlicht in:
Jahrbuch 1992 der Braunschweigischen
Wissenschaftlichen Gesellschaft, S.158-167



Verlag Erich Goltze KG, Göttingen

E. D. GILLES, Stuttgart

Modellgestützte Regelung, ein Beitrag zur Autonomie von Prozessen und Systemen*

Die klassische Aufgabe der Regelungstechnik besteht darin, Prozesse und Systeme trotz unterschiedlicher Störeinflüsse ihrem bestimmungsgemäßen Zweck entsprechend zu betreiben und dies möglichst ohne Einwirkung des Menschen.

So soll ein Flugzeug oder ein Schiff trotz unvorhersehbarer Strömungseinflüsse seinen vorgegebenen Kurs beibehalten;

eine chemische Anlage soll trotz Änderungen der Temperatur und des Drucks und trotz Schwankungen in der Rohstoffzusammensetzung einen Produktstrom gleichbleibender Qualität erzeugen;

weiter soll eine Antriebsanlage unabhängig von Lastschwankungen ihre Drehzahl aufrechterhalten.

Geregelte Prozesse und Systeme verfügen damit über einen bestimmten Grad an Autonomie: Ohne den Menschen vermögen sie auf Veränderungen ihrer Umwelt so zu reagieren, daß nur geringe Abweichungen vom erwünschten Verhalten auftreten. Erwünschtes Verhalten bedeutet nicht nur, daß bestimmte Größen wie Druck und Temperatur konstant gehalten werden. Das erwünschte Verhalten kann sich vielmehr an wesentlich komplizierteren Kriterien orientieren:

So soll z.B. eine chemische Anlage einen Produktstrom bestimmter Qualität erzeugen, ohne dabei aber den Menschen und die Umwelt zu gefährden oder zu belasten.

Gleichgültig, wo auch immer Regelungen zur Anwendung kommen, ob bei technischen Prozessen oder im nichttechnischen Bereich, wie z.B. bei biologischen Systemen, so beruht ihre Wirkungsweise stets auf demselben Grundprinzip:

Das dynamische Verhalten bestimmter Größen wird gemessen, um es dann mit dem erwünschten Verhalten dieser Größen zu vergleichen. Bestehen Abweichungen zwischen dem gemessenen und erwünschten Verhalten, so werden selbsttätig Maßnahmen ergriffen, die diesen Abweichungen entgegenwirken. Diese Maßnahmen sind Stell-eingriffe über Ventile, Ruder, Antriebsorgane und dergleichen.

Betrachten wir die Entwicklung der Regelungstechnik seit ihren Anfängen, so ist die Zielsetzung dieser Entwicklung darauf ausgerichtet, den Grad an Autonomie von Prozessen und Systemen, der durch Regelung erreicht werden kann, immer weiter zu erhöhen. Heute verfügen wir z.B. über autonom mobile Fahrzeuge, die sich in einer komplexen Navigationslandschaft zurechtfinden können, oder über Roboter, die komplizierte Aufgaben verrichten und dabei eine Vielzahl von Entscheidungen zu treffen haben.

* Vortrag anläßlich der Verleihung der Gauß-Medaille der Braunschweigischen Wissenschaftlichen Gesellschaft, Juni 1992

Einen hohen Grad an Autonomie kann man allerdings nur dann erreichen, wenn der aktuelle Zustand, in dem sich ein Prozeß oder System befindet, möglichst vollständig und genau zu bestimmen ist.

Im allgemeinen ist davon auszugehen, daß die an einem Prozeß installierten Sensoren die dazu erforderlichen Informationen nicht in vollem Umfang zur Verfügung stellen können. Es lassen sich zwar in einem chemischen Reaktor die Temperatur und der Druck leicht messen. Die primär interessierenden Konzentrationen und Qualitätsmerkmale von Produkten entziehen sich aber meist einer direkten meßtechnischen Erfassung. Um diese Schwierigkeiten bei der Bestimmung des aktuellen Prozeßzustands zu überwinden, ist es erforderlich, bei der Verarbeitung der Sensorinformationen auch zusätzliches a-priori-Wissen über das Prozeßverhalten zu berücksichtigen. Dieses a-priori-Wissen liegt im allgemeinen in Form eines mathematischen Modells vor, das in der Lage ist, das Prozeßverhalten zu beschreiben.

Die Frage stellt sich dabei, wie Sensorinformationen in geeigneter Weise mit a-priori-Wissen über das Prozeßverhalten verknüpft werden können. Völlig unabhängig von dem betrachteten Anwendungsgebiet lautet die Antwort auf diese Frage: durch *modellgestützte Informationsverarbeitung*.

Im folgenden sei dies an zwei sehr unterschiedlichen Beispielen erläutert. Dabei handelt es sich einmal um ein Problem der chemischen Verfahrenstechnik, nämlich um die Früherkennung gefährlicher Reaktionszustände in einem chemischen Reaktor. Bei dem zweiten Beispiel geht es um ein Verkehrsproblem und damit um ein völlig anderes Anwendungsgebiet. Es wird der Aufbau eines integrierten Navigationssystems für den Küsten- und Binnenbereich diskutiert. Es soll gezeigt werden, daß die Methoden, die in beiden Fällen zum Einsatz kommen, um einen gewissen Grad an Prozeß- und Systemautonomie zu erreichen, in ihren prinzipiellen Ansätzen gleich und durch eine modellgestützte Informationsverarbeitung gekennzeichnet sind.

Früherkennung gefährlicher Reaktionszustände

Betrachtet wird ein Reaktor, in dem eine Sulfonierungs- oder eine Nitrierungsreaktion in halbkontinuierlicher Betriebsweise durchgeführt wird. Halbkontinuierlich bedeutet, daß bestimmte Komponenten vorgelegt und andere kontinuierlich dem Reaktionsgemisch zudosiert werden. Das zu lösende Überwachungsproblem besteht darin, möglichst frühzeitig das Anspringen einer unerwünschten und stark exothermen Zersetzungsreaktion zu erkennen, die schließlich zu einem explosionsartigen Durchgehen des Reaktors führen kann. Dieses Anspringen der Zersetzungsreaktion wird nicht nur durch Temperatur und Druck bestimmt, die im Reaktor verhältnismäßig leicht gemessen werden können. Entscheidend sind vor allem auch die Konzentrationen bestimmter Zwischenprodukte und katalytisch wirkender Substanzen, die sich einer meßtechnischen Erfassung im Reaktor im allgemeinen entziehen. Um das Überwachungsproblem dennoch lösen zu können, muß man diese Konzentrationen in ihrem zeitlichen Verhalten aus leicht meßbaren Zustandsvariablen wie Druck und Temperatur rekonstruieren. Um dies zu ermöglichen, ist a-priori-Wissen über das Reaktions-

geschehen in Form eines detaillierten mathematischen Reaktormodells erforderlich. Dieses Modell simuliert man in Echtzeit, z.B. mit Hilfe eines Rechners und schaltet es dem realen Prozeß parallel. Dies bedeutet, daß die Informationen über die zeitlichen Verläufe der Steuergrößen, die wie Kühltemperatur, Zulaufkonzentrationen und Zulauftemperatur auf den Reaktor einwirken, soweit bekannt auch dem Reaktormodell zugeführt werden. Damit existieren zwei Welten und zwar eine reale Welt und eine auf dem Rechner realisierte Modellwelt. Zur realen Welt gehören der Reaktor und alle an dem Reaktor installierten Meßeinrichtungen. Die Modellwelt ist eine mit Hilfe des verfügbaren a-priori-Wissens auf dem Rechner in Echtzeit realisierte Nachbildung der realen Welt. Diese Nachbildung umfaßt auch Modelle aller zur Verfügung stehenden Meßeinrichtungen. Entscheidend ist nun, daß sich die Modellwelt mit der realen Welt stets in guter Übereinstimmung befindet. Dies muß trotz der unvermeidbaren Modellfehler gewährleistet sein, die die Modellwelt immer enthält. Auch unbekannte Störeinflüsse, die auf die reale Welt wirken, dürfen nicht zu einer Divergenz der beiden Welten führen. Um eine Konvergenz der Modellwelt gegen das Verhalten der realen Welt sicherzustellen, werden die verfügbaren Sensorsignale herangezogen. Die entsprechenden Größen in der Modellwelt werden mit Hilfe der dort verfügbaren Sensormodelle ebenfalls bestimmt, um sie dann mit den Sensorsignalen der realen Welt zu vergleichen. Unterschiede in den einander zugeordneten Signalen beider Welten werden dann zu Korrektursignalen verstärkt, mit denen dann korrigierend in die Modellwelt eingegriffen wird. Dieser Eingriff erfolgt im Sinne eines Abgleichs so, daß das Verhalten der Modellwelt möglichst rasch gegen das Verhalten der realen Welt konvergiert. Bei dem Kriterium, das diesem Abgleich zugrunde liegt, spielt die Minimierung der Gaußschen Fehlerquadrate eine entscheidende Rolle, um damit eine Verbindung zu dem heutigen Tag herzustellen.

Der Vorteil dieser Vorgehensweise besteht darin, daß man – im Vergleich zu den Sensorsignalen der realen Welt – aus der mit Hilfe eines Rechners simulierten Modellwelt wesentlich detailliertere Informationen über den Prozeß und seine Verhaltensweise gewinnen kann. Mit anderen Worten bedeutet dies, daß wir der Modellwelt nicht nur die leicht meßbaren Zustandsvariablen wie Temperatur und Druck, sondern darüberhinaus im Idealfall auch alle Konzentrationen nichtmeßbarer Zwischenprodukte und katalytisch wirkender Verunreinigungen in ihrer simulierten Form entnehmen können. Voraussetzung ist allerdings ein hinreichend genaues Modell der Reaktionskinetik und des Reaktors. Darüberhinaus muß der Prozeß eine wichtige Struktureigenschaft erfüllen. Er muß nämlich in seinen inneren Vorgängen über die zur Verfügung stehenden Meßgrößen beobachtbar sein. Trotz dieser Einschränkungen stellt die modellgestützte Informationsverarbeitung bei der Führung und Überwachung verfahrenstechnischer Prozesse ein äußerst leistungsfähiges Werkzeug dar.

Der Entwurf von Verfahren zur modellgestützten Informationsverarbeitung ist nicht immer einfach. Er kann im allgemeinen aber so erfolgen, daß der Abgleich zwischen beiden Welten trotz auftretender Störeinflüsse und trotz der stets vorhandenen Modell- und Meßfehler mit hinreichender Genauigkeit erfolgt. Die simulierten Zustandsvariablen können damit anstelle des nicht vollständig meßbaren Prozeß-

zustands zum Zwecke der Prozeßführung weiterverarbeitet werden. Im Hinblick auf das hier diskutierte Überwachungsproblem stehen damit alle Informationen zur Verfügung, um sehr frühzeitig die Gefahr des Anspringens gefährlicher Zersetzungsreaktionen zu erkennen. Geeignete Gegenmaßnahmen können dann in ein rechnergestütztes Prozeßführungskonzept integriert werden, um einen sicheren Reaktionsablauf zu gewährleisten. Wir haben solche Verfahren sowohl an Laborapparaten als auch an großtechnischen Produktionsanlagen erfolgreich erprobt und damit einen Beitrag zur Sicherheit von chemischen Anlagen leisten können.

Ein weiterer sehr wichtiger Anwendungsbereich dieser modellgestützten Informationsverarbeitung betrifft die Qualitätssicherung in der Verfahrenstechnik. Hier sind Prozeßführungskonzepte für chemische Produktionsanlagen zu entwickeln, die unabhängig von Störeinflüssen verschiedenster Art eine reproduzierbare Herstellung bestimmter Produktqualitäten erlauben.

Einem breiten Einsatz von Verfahren der modellgestützten Informationsverarbeitung in der chemischen Industrie stehen heute noch zwei Schwierigkeiten entgegen, und zwar das Modellierungsproblem und das Simulationsproblem.

In der Verfahrenstechnik gibt es eine fast unüberschaubare Vielzahl unterschiedlicher Apparatetypen. Eine Modellbibliothek, die Modelle für alle Apparatetypen enthält, wäre außerordentlich umfangreich und deshalb kaum zu pflegen und zu warten. Hinzu kommt, daß bei der Modellierung einer konkreten Anlage in der Regel doch noch Änderungen einiger Apparatemodelle vorgenommen werden müßten, um diese den realen Gegebenheiten anzupassen. Bei einer genaueren Analyse der unterschiedlichen Apparatemodelle stellt man allerdings fest, daß sich diese trotz all ihrer Unterschiede aus gleichartigen Modellbausteinen aufbauen lassen. Der Schlüssel zur Lösung des Modellierungsproblems besteht daher in der Definition eines vollständigen, aber zahlenmäßig begrenzten, Satzes elementarer Modellbausteine mit disjunkter Funktionalität, aus denen sich Apparatemodelle durch Verschalten und Aggregieren aufbauen lassen. Die Definition eines solchen Satzes von elementaren Modellbausteinen einschließlich der Regeln zu ihrer Verknüpfung entspricht einer an Gesichtspunkten des Modellierens orientierten Strukturierung des verfahrenstechnischen Wissens. Die Modellierung kann dann auf der Grundlage dieses Wissens rechnergestützt, und damit sehr effizient und flexibel, erfolgen, so daß sich auf diese Weise der Modellierungsengpaß beseitigen läßt.

Die Apparate- und Anlagenmodelle bestehen in der Regel aus Differential-Algebra-Gleichungssystemen von sehr hoher Ordnung. Für die numerische Behandlung solcher großen Gleichungssysteme stehen zwar heute bereits leistungsfähige Integratoren und Gleichungslöser zur Verfügung. Es gibt allerdings noch eine Reihe offener Fragen der numerischen Mathematik, die gelöst werden müssen, um den Simulationsengpaß zu beseitigen. Leistungsfähigere Simulationsstrategien sind insbesondere dann dringend erforderlich, wenn die Simulation wie im Falle einer modellgestützten Informationsverarbeitung in Echtzeit erfolgen muß.

Autonom mobiles Schiff für den Küsten- und Binnenbereich

Am Institut für Systemdynamik und Regelungstechnik wird im Rahmen des von der DFG geförderten Sonderforschungsbereichs „Hochgenaue Navigation“ ein integriertes Navigationssystem für die Binnen- und Küstenschifffahrt entwickelt und experimentell erprobt. Ziel dieses Projekts ist ein System, mit dessen Hilfe ein Schiff unter normalen Verkehrsbedingungen automatisch auf einer Wasserstraße geführt werden kann. Die Forderung nach voller Autonomie bedeutet, daß dieses Navigationssystem ohne zusätzliche Einrichtungen außerhalb des eigenen Schiffes auskommen muß. Ein solches System kann den Schiffsführer von ermüdenden Routinearbeiten entlasten und ihn insbesondere in schwierigen Situationen wie z.B. bei Nebel- und Nachtfahrten unterstützen. Dadurch läßt sich die Sicherheit des Verkehrs auf Wasserstraßen wesentlich erhöhen und das Risiko für die Umwelt beim Transport gefährlicher Güter erheblich vermindern.

Allgemein besteht die Aufgabe eines integrierten Navigationssystems darin, detaillierte Navigationsdaten bereitzustellen, um auf dieser Grundlage die Bewegung eines autonom mobilen Fahrzeugs in einer Navigationslandschaft planen und ausführen zu können. Zur Erfüllung dieser Aufgabe stehen einem Navigationssystem unterschiedliche Informationsquellen zur Verfügung. Dazu gehören:

- Bildgebende Sensoren (Radar, Videokamera, Laserscanner) zur Erfassung der Navigationsumgebung des Fahrzeugs)
- Sensoren (Inertial-, Ultraschall-, Laser-...) und Ortungsverfahren (Funk, Satelliten, ...) zur Bestimmung von Position, Kurs und Geschwindigkeit des navigierenden Fahrzeugs
- A-priori-Wissen in Form eines mathematischen Modells zur Beschreibung der Fahrzeugdynamik
- A-priori-Wissen in Form einer Bank mathematischer Modelle zur Beschreibung des dynamischen Verhaltens fremder Fahrzeuge
- A-priori-Wissen in Form einer Wissensbasis zur Darstellung der Navigationslandschaft (elektronische Geländekarte, Stadtplan, Plan einer Fabrikhalle ...)
- Wissensbasis zur Darstellung von Verkehrsregeln.

Die Bezeichnung „integriert“ bedeutet, daß das Navigationssystem Meßinformationen verschiedenartiger Sensoren und unterschiedlicher Arten von abgespeichertem a-priori-Wissen koordiniert verarbeitet, um die gestellte Aufgabe der Fahrzeugführung zu lösen. Die Verarbeitung dieser sehr unterschiedlichen Informationen muß in Echtzeit erfolgen und schließlich zur Generierung einer Leitlinie führen, der das Fahrzeug durch geeignete Betätigung seiner Steuer- und Antriebsorgane selbsttätig folgt.

Im konkreten Fall des von uns für den Binnen- und Küstenbereich konzipierten autonom mobilen Schiffes stehen folgende Informationsquellen zur Verfügung:

- Bordradar und Laserscanner als bildgebende Sensoren
- Kurs- und Wendekreisel

- GPS-Empfänger zur Positions- und Geschwindigkeitsbestimmung
- Ultraschall-Doppler-Log zur Geschwindigkeitsbestimmung gegenüber Grund oder Wasser
- Mathematisches Modell für die Längs- und Querdynamik des navigierenden Schiffes
- Bank mathematischer Modelle zur Beschreibung der Dynamik fremder Schiffe
- Elektronisch gespeicherte Karte der Wasserstraße als Modell der Fluß- und Küstenlandschaft mit allen für die Navigation wichtigen Besonderheiten und Angaben
- Wissensbasis für die Darstellung der Verkehrsregeln.

Bei der integrierten Informationsverarbeitung im Navigationssystem werden den verschiedenen Informationsquellen unterschiedliche Gewichte zugeordnet, die ihrer Bedeutung für das Navigieren sowie ihrer Genauigkeit und Zuverlässigkeit entsprechen. Diese Gewichte sind nicht konstant, sondern ändern sich zeitlich mit den jeweiligen Gegebenheiten. Die offene und modulare Struktur des von uns entwickelten, redundant ausgelegten Navigationssystems erlaubt es, neue Informationsquellen hinzuzufügen oder im Falle einer Störung bei gegebenenfalls eingeschränktem Funktionsumfang auch auf die eine oder andere Quelle zu verzichten.

Das Navigationssystem erfüllt folgende Funktionen:

- Bestimmung der Position, des Kurswinkels und der Geschwindigkeit des navigierenden Schiffes in einer in Gauß-Krüger-Koordination elektronisch abgespeicherten Flußkarte
- Verfolgung der Positionen und Geschwindigkeiten aller Objekte im Bereich des Fahrwassers (andere Schiffe, Radartonnen, ...) zur Erfassung der aktuellen Verkehrssituation
- Planung der Leitlinie in der lokalen Navigationsumgebung mit der Möglichkeit eines interaktiven Eingriffs durch den Schiffsführer
- Führung des Schiffes entlang der Leitlinie durch Eingriff in Ruderanlage und Antriebsmaschine
- Kommunikation mit dem Schiffsführer zur Überwachung und Bedienung des Navigationssystems.

Um ein Fahrzeug in einer Navigationsumgebung unter Berücksichtigung vorgegebener Verkehrsregeln führen zu können, müssen sowohl über die Position und den Bewegungszustand des Fahrzeugs als auch über dessen Navigationsumgebung genügend genaue und detaillierte Informationen vorliegen. Im allgemeinen ist davon auszugehen, daß die auf dem Fahrzeug installierten Sensoren die benötigten Informationen nicht in vollem Umfang zur Verfügung stellen können. Deshalb ist es erforderlich, bei der Verarbeitung der Sensorinformationen – wie im vorher betrachteten Beispiel chemisch verfahrenstechnischer Prozesse – auch zusätzliches a-priori-Wissen einzubringen. Dieses Wissen betrifft jetzt das Fahrzeugverhalten und die Eigenschaften der aktuellen Navigationsumgebung, in der sich das Fahrzeug bewegt. Eine geeignete Verknüpfung

von Sensorinformationen und a-priori-Wissen kann auch hier über eine modellgestützte Informationsverarbeitung erfolgen. Die reale Welt umfaßt in diesem Beispiel das navigierende Schiff einschließlich aller darauf installierten Sensoren sowie die lokale Navigationsumgebung dieses Schiffes mit den anderen Verkehrsteilnehmern. Die Modellwelt ist eine auf dem Rechner simulierte Abbildung dieser Realität mit Echtzeitverhalten.

Die Quer- und Längsdynamik des navigierenden Schiffes wird durch ein mathematisches Modell beschrieben. Eine wesentliche Voraussetzung für die Nachbildung der lokalen Navigationsumgebung ist die Verfügbarkeit einer elektronischen Karte der Wasserstraße. In dieser Wasserstraßen-Datenbank sind alle für die Nachbildung der Wasserstraße und für die Schiffsführung notwendigen Informationen abgelegt. Der Aufbau dieser Karte orientiert sich an den Anforderungen, die sie im integrierten Navigationssystem zu erfüllen hat. Diese sind vor allem durch die geforderte Echtzeitfähigkeit der implementierten Algorithmen gegeben. So steht für das Lesen und Auswerten der für den Vergleich mit einem Radarbild erforderlichen Karteninformationen weniger als eine Sekunde Echtzeit zur Verfügung. Die Karte ist als eine objektorientierte Datenbank realisiert, die den für den Bildvergleich erforderlichen sehr schnellen Zugriff erlaubt. Ihre Darstellung erfolgt in Gauß-Krüger-Koordinaten. Die Datenbank unterscheidet zwischen realen und virtuellen Objekten. Zu den realen Objekten gehören alle sichtbaren Objekte wie Uferlinien, Brücken, Buchten, Buhnen etc. Virtuelle Objekte beinhalten Informationen, die für die Schiffsführung relevant sind, wie z.B. Flußachse, Fahrwassergrenzen und Idealkurs für die Berg- und Talfahrt.

Die Navigationsumgebung umfaßt auch die dort navigierenden fremden Schiffe und verankerten Radartonnen. Um diese hinsichtlich ihrer Position und ihres Bewegungsverhaltens nachbilden zu können, steht in der Modellwelt eine Bank dynamischer Schiffsmodelle zur Verfügung. Jedes dieser Modelle beschreibt die Quer- und Längsdynamik eines fremden Objekts, wobei im Falle eines fremden Schiffes sowohl die Ruderstellung als auch die Motordrehzahl als unbekannte Stellgrößen zu betrachten sind.

Mit dem mathematischen Modell des navigierenden Schiffes, der elektronischen Fluß- oder Küstenkarte und den Modellen für fremde Objekte läßt sich im Rechner ein Abbild der realen Welt schaffen. Entscheidend ist nun, daß der Abgleich dieser Modellwelt mit der realen Welt gelingt. Wie bereits beschrieben, ist ein Vergleich der Sensorsignale mit den entsprechenden Signalen der Modellwelt die Basis dieses Abgleichs. Das Ziel ist dabei eine möglichst genaue Schätzung der Position des navigierenden Schiffes und eine möglichst wirklichkeitsgetreue Nachbildung der das Schiff umgebenden Navigationslandschaft. Letztere schließt auch eine zuverlässige Rekonstruktion der Trajektorien aller in der Umgebung befindlichen fremden Schiffe mit ein.

Bei den weiteren Betrachtungen wollen wir uns auf den Abgleich zwischen Modellwelt und realer Welt anhand des Vergleichs zwischen Radarbild und abgespeicherter Flußkarte konzentrieren. Dabei gehen wir von der Annahme aus, daß aufgrund der Auswertung früherer Radarbilder und durch eine Prädiktion mit Hilfe des als a-priori-Wissen zur Verfügung stehenden Schiffsmodells eine erste möglicherweise noch grobe

Positionsschätzung des navigierenden Schiffes vorliegt. Gibt man der elektronischen Karte diese Koordinatenwerte vor, so liefert diese alle in der Nähe befindlichen Kartenobjekte mit ihren Abständen zu dieser Position. Mit diesen Informationen läßt sich eine dem Radarbild vergleichbare Kontur der aktuellen Navigationsumgebung erstellen. Im Sinne eines Abgleichs wird die prädierte Schiffposition solange vom Rechner variiert, bis das Radarbild und die Flußkarte bestmöglichst zur Deckung gebracht sind. Auf diese Weise gelangt man zu einer verbesserten Schätzung der Schiffposition. Der Bildvergleich liefert also Korrekturwerte für die aufgrund früherer Messungen prädierte Schiffposition und zwar in dem absoluten Koordinatensystem der Flußkarte.

Die Unsicherheit, mit der die Bestimmung der Koordinatenwerte aus einem Bildvergleich behaftet ist, hängt von den strukturellen Gegebenheiten des betrachteten Bildes ab. So ist die Unsicherheit bei der Bestimmung der Korrekturkomponente in Flußlängsrichtung immer dann groß, wenn das aktuelle Bild keine markanten Strukturen besitzt, die eine genaue Schätzung der Flußlängsposition ermöglichen. Dies gilt z.B. im Falle eines geraden oder konstant gekrümmten Flußabschnitts ohne besondere Merkmale quer zur Flußrichtung wie Brücken, sichtbare Buhnen oder auch Buchten im Flußufer. Um auch unter diesen Gegebenheiten zu einer möglichst optimalen Schätzung der Schiffposition zu gelangen, muß man die mit Hilfe des Schiffsmodells prädierte Position und die aus dem Bildvergleich ermittelte Position mit Gewichten behaften, die der Genauigkeit des Modells und der aktuellen Genauigkeit des Bildvergleichs entsprechen. In Abhängigkeit von den jeweiligen Gegebenheiten ist also einmal stärker die Prädiktion mit Hilfe des Modells und einmal stärker der Bildvergleich für die Positionsschätzung des navigierenden Schiffes heranzuziehen. Ein modellgestütztes Meßverfahren, das diesen Anforderungen genügt, ist das Kalman-Filter-Verfahren. Darüberhinaus bietet die Kalman-Filter-Technik die Möglichkeit, auch Informationen anderer Sensoren unter Berücksichtigung ihrer Fehlereigenschaften in die modellgestützte Informationsverarbeitung einzubeziehen, um auf diese Weise ein integriertes Navigationssystem aufzubauen.

Obwohl der Bildvergleich im allgemeinen auch für die Bestimmung der Schiffposition in Flußlängsrichtung genügend Informationen liefert, ist eine Stützung durch einen geschwindigkeits- oder weggebenden Sensor wie das Ultraschall-Doppel-Log oder GPS sehr vorteilhaft, um in jeder Situation ein absolut sicheres und genaues Mitführen der Karte zu gewährleisten.

Ein Radarbild liefert nicht nur ein Abbild der aktuellen Navigationslandschaft, sondern auch Echos fremder Objekte, die sich im Fahrwasser bewegen oder die in dessen Randbereich verankert sind. Beispiele sind vor allem fremde Schiffe und Radartonnen. Zur Nachbildung dieser Objekte steht in der Modellwelt eine Bank von dynamischen Modellen zur Verfügung. Jedem Objekt, das im Radarbild erscheint, wird eines dieser Modelle zugeordnet. Dabei werden mögliche Ruder- und Antriebskräfte dieser Objekte als unbekannte Größen betrachtet. Die mit den Modellen berechneten Positions- und Geschwindigkeitswerte müssen nun mit den entsprechenden Werten der realen Welt in Übereinstimmung gebracht werden. Dazu reicht allerdings ein einzelnes Radarbild nicht aus. Vielmehr muß man die chronologische Entwicklung der gesamten Verkehrs-

szenen auswerten. Diese Auswertung liefert dann auch eine Schätzung der jeweiligen Ruder- und Antriebskräfte.

Nach Eintreffen eines neuen Radarbildes wird dieses zunächst interpretiert. Dies bedeutet, daß die erkannten fremden Objekte entweder bereits bestehenden oder neu zu beginnenden Objektbahnen zugeordnet werden. Bei dieser Interpretation des Radarbildes besteht allerdings auch die Möglichkeit, bestimmte Erscheinungen im Radarbild nicht als Objekt, sondern als Störungen zu interpretieren. Es ist leicht vorstellbar, daß die Bildinterpretation mehrere Hypothesen zuläßt, denen nicht zuletzt auch aufgrund der Vorgeschichte bestimmte Wahrscheinlichkeiten zugeordnet werden können. Jede dieser Hypothesen ist dann bis zum Eintreffen des nächsten Radarbildes weiterzuverfolgen. Ein Problem ist das exponentielle Anwachsen der Anzahl dieser Hypothesen mit der Zeit. Um die Bahnkurven der einzelnen Objekte zu schätzen, kommen auch hier Kalman-Filter zum Einsatz. Die Bildinterpretation erfolgt mit Hilfe rekursiver Bayesscher Hypothesentest-Verfahren.

Gelingt es, in der beschriebenen Weise das Verhalten der Modellwelt mit dem der realen Welt in Übereinstimmung zu bringen, so lassen sich dieser Modellwelt alle Informationen entnehmen, die auf der Leitebene benötigt werden, um das Schiff automatisch zu führen. Zunächst erfolgt auf der Leitebene die Planung der Leitlinie, der das Schiff nachzuführen ist. Die Basis dieser Planung sind die in der Datenbank der elektronischen Flußkarte abgelegten Ideallinien für die Berg- und Talfahrt. Diese Ideallinien sind als Leitlinien zu verwenden, solange es die aktuell vorliegende Verkehrssituation erlaubt. Falls erforderlich, können die Ideallinien auch wasserstandsabhängig abgespeichert werden. Die Planung einer Leitlinie muß vor allem die aktuelle Verkehrssituation und damit die Ergebnisse der Objektverfolgung berücksichtigen. Sie muß unter Beachtung der jeweiligen Verkehrsregeln erfolgen. Wichtig ist eine übersichtliche Darstellung der Planungsergebnisse auf einem Farbbildschirm und die Möglichkeit für den Schiffsführer, interaktiv in den Planungsvorgang einzugreifen. Die Bahnregelung des Schiffes geschieht durch direkten Eingriff des Navigationssystems in die Ruder- und Antriebsanlage. Dabei ist die durch das Schiffsmodell beschriebene Schiffsdynamik und in gewissen Grenzen auch die Strömungsdynamik der Wasserstraße zu beachten.

Zur Erprobung des entwickelten Navigationssystems stehen zwei institutseigene Versuchsboote sowie kommerzielle Motorgüterschiffe zur Verfügung. Die hier beschriebene Funktionalität des Navigationssystems ist weitgehend erreicht und auch erfolgreich experimentell unter realistischen Voraussetzungen erprobt. Ein automatisches Fahren ist überall dort möglich, wo elektronische Karten der Wasserstraße zur Verfügung stehen. Zur Zeit gilt dies für den Rhein und einige seiner wichtigsten Nebenflüsse, einen Teil der Donau und den Main-Donau-Kanal. Einer der nächsten Schritte wird darin bestehen, die Voraussetzungen zu schaffen, um das entwickelte Navigationssystem auf Binnenwasserstraßen großtechnisch zum Einsatz bringen zu können.

Abschließende Bemerkungen

Mit den beiden Beispielen wollte ich zeigen, wie eine modellgestützte oder auch wissensbasierte Informationsverarbeitung erfolgen kann, um Systeme und Prozesse mit einem hohen Grad an Autonomie auszustatten. Obwohl die beiden Beispiele sehr verschiedenen technischen Anwendungsgebieten zuzuordnen sind, ist die Methodik der Vorgehensweise grundsätzlich die gleiche. Daran ist zu erkennen, daß die Regelungstechnik mit ihrem methodischen Vorgehen eine Klammer zwischen unterschiedlichen Gebieten der Technik bildet und der durch fortschreitende Diversifizierung bedingten Verfremdung in der Technik entgegenwirkt. Auch in diesem Sinne wird der Regelungstechnik in Zukunft eine wachsende Bedeutung zukommen.

Prof. Dr. E. D. Gilles
Bauernwaldstraße 131 · 7000 Stuttgart 1